ChinaXiv合作期刊

水斗式水轮发电机组折向器应用研究

普碧才[1] 刘晓欣[1] 邓亚琪[2] 冯培磊[2] 徐天奇[2]

（1. 云南电网有限责任公司怒江供电局 六库 673199

2. 云南民族大学电气信息工程学院 昆明 650500）



普碧才 男 1983年生，本科，工程师，主要从事电力调度工作。



刘晓欣 男 1986年生，本科双学士，工程师，主要从事调控技术研究与电网稳定分析工作。

摘要：对怒江电网高频切机动作后可能出现的问题进行分析，并结合该电网内水轮发电机组构成情况，对水斗式水轮发电机组折向器应用功能进行研究，提出切实可行的解决方法，对怒江电网联络线故障跳闸后的独立电网安全、稳定运行具有十分重要的意义。

关键词：水轮发电机组 高频切机 折向器 独立电网

中图分类号：TK735.1；TM313

Application Research of Jet Deflectors on Pelton-Type Hydro-Generators Units

Pu Bicai[1] *Liu Xiaoxin*[1] *Deng Yaqi*[2] *Feng Peilei*[2] *Xu Tianqi*[2]

（1. Yunnan Power Grid Corporation Limited Liuku 673199 China

2. Yunnan Minzu University Kunming 650500 China）

Abstract: The possible problems after the over frequency generator tripping of Nujiang power grid are analyzed. Taking the composition of hydro-generator-units in Nujiang power grid into account, the applications and effectiveness of the jet deflectors on pelton-type hydro-generators units are studied. The solutions based on the jet deflectors for frequency rising, without over frequency generator tripping, of the Nujiang isolated grid after the tripping out of interconnection line between Nujiang power grid and the main grid of Yunnan province caused by faults are proposed, which are of great significance to the secure and stable operation of Nujiang power grid.

Keywords: Hydro-generators unite, over frequency generator tripping, jet deflector, isolated power grid

1　引言

高频切机功能是为送出型片区电网联络线故障跳闸后，防止独立电网频率过高瓦解而导致大面积停电设置的，但由于发电机组开机方式、发电出力及用电负荷的不可预见性，在高频切机动作过程中可能会出现发电机组过切而导致低频低压减载动作，若低频低压减载动作所切除的负荷过多，又会使机组高频切机动作，导致同步运行机组减少而使频率随负荷变化而产生过大的波动；同时输电线路与大地之间存在电容效益，联络线故障跳闸后空载或轻载运行的输电线路产生大量的无功功率流向系统，由于高频切机动作切除部分发电机组后调压能力变差而使电压偏高，严重威胁到了独立电网的安全稳定运行，极易使独立电网瓦解而造成大面积停电；而利用水斗式水轮发电机组的折向器功能，与高频切机功能相比具有不可替代的优势。

水斗式水轮机是借助于特殊导水机构（喷管）引出仅具有动能的自由射流，冲向转轮水斗，使转轮旋转做功，从而完成将水能转换为机械能的一种水力原动机，是水电站的动力设备之一，用来带动发电机工作以获取电能。其流量调节通过移动喷针位置来实现，喷针的移动由调速器控制的接力器操纵 [1]。当机组甩负荷时，为了避免机组转速上升和机组频率上升，要尽快关闭喷嘴以减少流量，但关闭速度过快会在压力水管中产生水击现象，使压力上升。所以要在转轮与喷嘴之间安装折向器，折向器是冲击式水轮发电机的水轮自动控制装置，利用它迅速切入射流，部分或全部偏转射流方向，使射向转轮的水流部分或全部被隔断，避免机组转速上升过高和机组频率上升过高 [2]，当频率下降至某一整定值后，折向器复归。

本文结合怒江电网内水轮发电机组构成情况，对水斗式水轮发电机组折向器应用功能进行研究，提出切实可行的解决方法，对怒江电网联络线故障跳闸后的独立网安全、稳定运行具有十分重要的意义。

2　怒江电网水轮发电机组简介

截止到 2016 年 7 月 31 日，怒江电网内并入主网运行的水轮发电机组总装机容量为 137.25 万 kW，总机组台数为 235 台，均为水斗式水轮发电机组和混流式水轮发电机组，分布在整个怒江州的泸水、福贡、贡山和兰坪。从整个怒江电网来看，单机容量在 1 000kW 及以上的水斗式水轮发电机组有 118 台，总装机容量为 106.95 万 kW，占并入主网运行的水轮发电机组总装机容量的 77.92%；单机容量在 1 000kW 及以上的混流式水轮发电机组有 47 台，总装机容量为 26.70 万 kW，占并入主网运行的水轮发电机组总装机容量的 19.45%。从各个县来看，贡山县并入主网运行的水轮发电机组总装机容量为 39.25 万 kW，单机容量在 1 000kW 及以上的水斗式水轮发电机组有 20 台，总装机容量为 28.79 万 kW，占贡山县并入主网运行的水轮发电机组总装机容量的 73.35%；单机容量在 1 000kW 及以上的混流式水轮发电机组有 10 台，总装机容量为 9.84 万 kW，占贡山县并入主网运行的水轮发电机组总装机容量的 25.06%。福贡县并入主网运行的水轮发电机组总装机容量为 44.53 万 kW，单机容量在 1 000kW 及以上的水斗式水轮发电机组有 46 台，总装机容量为 35.65 万 kW，占福贡县并入主网运行的水轮发电机组总装机容量的 80.06%；单机容量在 1 000kW 及以上的混流式水轮发电机组有 14 台，总装机容量为 7.68 万 kW，占福贡县并入主网运行的水轮发电机组总装机容量的 17.25%。泸水县并入主网运行的水轮发电机组总装机容量为 40.62 万 kW，单机容量在 1 000kW 及以上的水斗式水轮发电机组有 32 台，总装机容量为 31.31 万 kW，占泸水县并入主网运行的水轮发电机组总装机容量的 77.08%；单机容量在 1 000kW 及以上的混流式水轮发电机组有 19 台，总装机容量为 8.48 万 kW，占泸水县并入主网运行的水轮发电机组总装机容量的 20.88%。兰坪县并入主网运行的水轮发电机组总装机容量为 12.85 万 kW，单机容量在 1 000kW 及以上的水斗式水轮发电机组有 20 台，总装机容量为 11.20 万 kW，占兰坪县并入主网运行的水轮发电机组总装机容量的 87.16%；单机容量在 1 000kW 及以上的混流式水轮发电机组有 4 台，总装机容量为 0.70 万 kW，占兰坪县并入主网运行的水轮发电机组总装机容量的 5.40%。从以上简介可以看出，不论是从整个怒江电网还是从各个县来看，不论是从机组台数还是从装机容量来看，水斗式水轮发电机组都占据了很大的比例。

3　无折向器时甩负荷

单机甩 100% 额定负荷瞬间，忽略发电机功率损耗，则原动机输出功率为发电机组额定功率频率 P_n，对应的转矩为

$$T = \frac{P_n}{\Omega} = \frac{p}{2\pi}\frac{P_n}{f} \tag{1}$$

式中，Ω 为发电机机械转接速度（rad/s）；p 为发电机极对数。

由于此时没有电磁转矩，所以加速转矩为 T，此时方程为

$$T-0=\frac{p}{2\pi}\frac{P_n}{f}=J\frac{d\Omega}{dt}=\frac{2\pi}{p}\frac{df}{dt} \quad (2)$$

可得发电机此时频率变化率为

$$\frac{df}{dt}=\frac{p^2P_n}{4J\pi^2f} \quad (3)$$

式中，P_n 为发电机组额定功率（W）；J 为发电机组转动部分的转动惯量（$kg\cdot m^2$）。

若片区电网送出有功功率为 P_s，则片区电网与主网联络线故障跳闸后独立电网的频率加速度计算公式如下

$$\frac{df}{dt}=\frac{p^2P_s}{4J_s\pi^2f} \quad (4)$$

式中，P_s 为片区电网与主网联络线故障跳闸后独立电网的剩余有功功率（W）；J_s 为片区电网内所有并列运行发电机组转动部分的总转动惯量（$kg\cdot m^2$）。

显然，如果没有折向器，在甩负荷之后的较长时间内，由于水轮机喷针不能快速关闭，水轮机输出几乎不变，但是发电机没有输出，导致发电机频率急剧上升，从而导致孤立电网频率上升，从而诱发高频切机。

4 高频切机存在的问题

高频切机措施 [3] 是地区电网安全稳定运行的一道重要防线，对缓解地区电网解列后的高频问题能起到一定作用，但由于高频切机措施判据简单，容量离散性大，具有局限性，与运行方式多样性间很难完全配合，不可避免会出现过切或欠切情况。

在以电力外送为主的地区电网中，若地区电网与主网联络线路发生永久性故障，有可能出现独立网运行的情况，而且独立网运行很可能会存在高频问题，此时就需要采取必要的高频切机措施来控制独立网运行频率在合格的范围内。

怒江电网作为送出型电网，在运行过程中，发电机组开机方式、发电瞬时出力及用电负荷存在不可预见性。联络线故障跳闸后，独立运行的电网不可避免地出现高频切机过切而使频率过低，导致低频低压减载动作而切除部分用电负荷，若低频低压减载动作所切除的负荷过多，又会使机组高频切机动作，导致同步运行机组减少而使频率随负荷变化而产生过大的波动；同时输电线路与大地之间存在电容效应，联络线故障跳闸后空载或轻载运行的输电线路产生大量的无功功率流向系统，而由于高频切机动作切除部分发电机组后，系统的调压能力变差而使电压偏高，严重威胁到了独立电网的安全稳定运行，极易使独立电网瓦解而造成大面积停电。

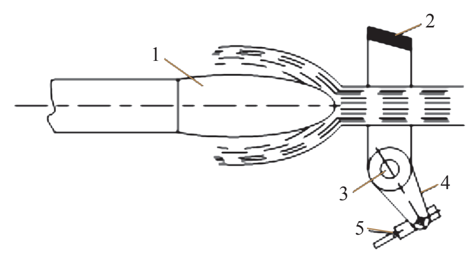
5 水斗式水轮机折向器功能在怒江电网的应用

水斗式水轮机的电站一般水头较高，压力钢管较长。当机组甩负荷时，从压力钢管的安全角度出发，不允许在较短时间内关闭喷嘴，切断流量。否则水流压力上升很高，一般规定水斗式水轮机甩全负荷时，喷针接力器从全开位置运动到全关位置的关闭时间在 15 ～ 30s。显然，甩负荷时不采取其他措施以这样的时间关断射流，机组转速上升率肯定远远超过允许值，从而频率上升率超过允许值，增设飞轮虽能降低一些水流圆周速度矢量与相对速度矢量的夹角，但仍不能解决问题。因此，需要设置折向器。

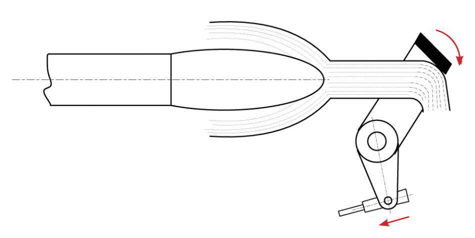
5.1 水斗式水轮机折向器的工作原理

水斗式水轮机折向器位于喷嘴和转轮之间，折向器受协联操作机构控制。在机组正常运行时，协联操作机构带动折向器随射流直径大小变化而调整位置，始终与射流表面保持 2 ～ 4mm 的距离，不妨碍射流的正常工作（见图 1a）。当发电机突减负荷使频率升高至某一整定值时，协联操作机构能使折向器不等射流直径完全变小，在极短时间（约 2s）内切入射流，将射流直接偏引到下游（见图 1b），使机组转速上升不致于过高。喷嘴就可在规定的时间内缓慢关闭，压力钢管的安全可得到保证。此时由于发电机组失去了动力矩而引起频率下降，当频率下降至某一整定值后，折向器复归，又恢复到射流旁边，给发电机提供动力矩来维持其频率在允许范围内，同时做好下一次动作的准备。不同的水斗式水轮机折向器起动和复归时间长短是不一样的，需要通过甩负荷试验来测定。

折向器工作原理如图 2 所示。水轮发电机组甩负荷时由电气装置输入的负荷信号通过电液转换器将电信号转换为控制油压力信号，并传递给主配阀，主配阀再通过液压管路将油压信号传递给折向器接



（a）折向器在正常工况运行



（b）折向器在甩负荷工况运行

图 1　折向器工作情况

Fig.1　Jet deflector operated condition

1—喷针　2—折向器　3—转轴　4—拐臂　5—协联杠杆

力器，折向器接力器通过活塞移动从而带动杆件动作使折向器关闭。

5.2　怒江电网水轮机折向器的应用情况

水斗式水轮发电机组占据了很大的比例，这给折向器功能在怒江电网的应用创造了较好的条件。将怒江电网内水斗式水轮发电机组的高频切机功能用折向器功能来代替，且在整定水斗式水轮发电机组折向器起动和复归频率时，为了充分利用发电机组的转动惯量，按下表所示的原则进行整定。其中，怒江电网中装机容量≥12.5MW，且用 100% 额定负荷瞬间具有最小频率加速度，折向器起动时间最短的水斗式水轮发电机组分为 2 批，频率达到 51.5Hz 起动第一批，频率达到 52Hz 时起动第二批；12.5MW＞装机容量≥7MW，用 100% 额定负荷瞬间频率加速度不大，折向器起动时间最短的水斗式水轮发电机组做类似处理。

5.3　折向器应用效果分析

在片区电网与主网联络线故障跳闸后，由于独立电网内发电负荷大于用电负荷，使发电机组所受的动力矩大于阻力矩，导致发电机组转速增加而造成频率升高 [4]。若此时利用水斗式水轮发电机组的折向器功能，则与高频切机功能相比具有如下不可替代的优势：

（1）片区电网与主网联络线故障跳闸后，发电机组频率达到水斗式水轮机折向器起动轮级的起动频率时，水斗式水轮机折向器轮级起动甩开该轮级内所有水斗式水轮发电机组所带的负荷，同时发电机组调速器动作缓慢关小片区电网内所有水轮发电机组的喷针或导叶，由于水斗式水轮发电机组自始至终未脱离电网，在剩余有功功率 P_s 变小的情况下，总转动惯量 J_s 不变，从而更有利于较快地减小频率加速度值，这对制止频率上升过高，并使其向额定频率恢复的调节作用是非常有利的 [5-7]。当剩余

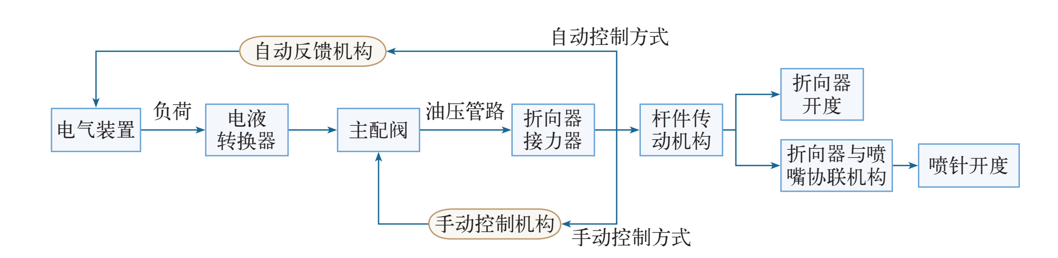


图 2　折向器工作原理框图

Fig.2　Jet deflector operation principle diagram

表　怒江电网水轮机折向器整定值

Tab.　Nujiang power grid hydro-generator jet deflector setting value

起动顺序	机组特点	起动批次	起动频率 /Hz	复归频率 /Hz
1	装机容量≥12.5MW，用 100% 额定负荷瞬间具有最小频率加速度，折向器起动时间最短的水斗式水轮发电机组	一	51.50	51.00
		二	52.00	51.50
2	12.5MW＞装机容量≥7MW，用 100% 额定负荷瞬间频率加速度不大，折向器起动时间最短的水斗式水轮发电机组	三	52.50	52.00
		四	53.00	52.50
3	装机容量≥12.5MW，折向器起动时间长的水斗式水轮发电机组	五	54.00	53.00
4	装机容量＜7MW，折向器起动时间长的水斗式水轮发电机组	六	55.00	54.00

有功功率 P_s 变为零时，片区独立电网的频率已上升至最高，此时由于发电机组频率高于额定频率，喷针或导叶继续关小，使得发电出力小于用电负荷，导致动力矩小于阻力矩而降低频率，在降低频率的过程中，折向器按轮级复归，直到发电机组频率恢复至额定频率，喷针或导叶才停止关小，最后片区独立电网在发电机组调速器的调节作用下进入稳定运行 [8]。

（2）在发电机组甩负荷不大，水斗式水轮发电机组折向器起动而致使发电出力小于用电负荷的情况下，由于折向器能够复归，可避免低频减载功能的动作。水斗式水轮机的折向器一般按保护机构设计 [9]。当水轮机负荷骤减时，若折向器不动作，转速升高或频率升高很大，必须由折向器迅速地将喷向水斗的射流岔开 [10]，折向器动作时间越短，转速或频率上升的程度越低，即转速升高率或频率升高率越小，同时缓慢地将喷嘴调节到与新负荷相适应的位置，以避免在很长的压力管道内引起压力急剧增高或频率大幅度增加。当喷嘴稳定在新位置后，折向器复归，又回到射流旁，并准备下一次的动作。折向器复归后，发电机出力可由水轮机喷嘴控制，从而可以避免频率过低。

（3）正常运行时，折向器不参与调节，只有当机组转速或频率突增到某一整定值时，折向器才迅速投入，切断射流 [11]；而当转速下降，低于返回值时，折向器返回。这种双重调节方式既可保证小波动状态的调节品质，又可满足调节保证的要求。若片区电网发电出力不足而从主网受入有功功率时，在联络线故障跳闸而导致片区独立电网内低频减载装置动作过切用电负荷的情况下，由于折向器功能发挥了较好的作用而不会出现高频切机功能动作的恶性循环，在很大程度上增强了片区电网的抗干扰能力。

（4）机组高频切机 [12] 动作时，由于输电线路与大地之间存在电容效应，联络线故障跳闸后空载或轻载运行的输电线路产生大量的无功功率流向系统，由于高频切机动作切除部分发电机组后调压能力变差而使电压偏高，严重威胁到了独立电网的安全稳定运行，极易使独立电网瓦解而造成大面积停电。而应用折向器之后，虽然联络线故障跳闸后空载或轻载运行的输电线路产生大量的无功功率流向系统，但此时所有运行机组共同吸收多余的无功功率而在很大程度上遏止了电压过高的现象。

6 结论

折向器功能与高频切机功能相比，具有不可替代的优势，为了让折向器功能发挥出更好的作用，对起动和复归时间相对较长的折向器进行技术改造，使其在尽可能短的时间内完成指令任务，从而确保在片区电网与主网解列后频率上升幅度最小。

参考文献

[1] 陈丹，杨建东．冲击式水轮机折向器方程的探讨 [J]．人民长江，2007，38(6)：65-68．
Chen Dan, Yang Jiandong. The discussed of the impact hydro-generator jet deflector equation[J]. The People of the Yangtze River, 2007, 38(6) : 65-68.

[2] 梁舜．斜击式水轮机折向器影响出力的原因及处理 [J]．小水电，2003(3)：32-33，35．
Liang Shun. Oblique blow type hydro-generator jet deflector to affect the output of reason and the treatment[J]. Small Hydropower, 2003(3) : 32-33, 35.

[3] 李承钧．怒江电网高频切机措施研究 [J]．云南电力技术，2013，41(3)：107-110．
Li Chengjun. Nujiang Power Grid over frequency generator tripping measures research[J]. Yunnan Electric Power Technology, 2013, 41(3) : 107-110.

[4] 孔德兵，宋明明，简利胜．怒江电网高频问题及解决措施 [J]．云南电力技术，2015，43(3)：35-36．
Kong Debing, Song Mingming, Jian Lisheng. Nujiang Power Grid high frequency problems and solutions[J]. Yunnan Electric Power Technology, 2015, 43(3) : 35-36.

[5] 唐戢群，毛成．水电机组孤网运行问题的研究与探讨 [J]．贵州电力技术，2008，增刊：70-72．
Tang Jiqun, Mao Cheng. Hydro-generator-units isolated network running research and discussion[J]. Guizhou Electric Power Technology, 2008, Supplement: 70-72.

[6] 丁永胜．大型水轮发电机组稳定性浅析 [J]．云南电力技术，2010，39(6)：105-106．
Ding Yongsheng. Large hydro-generator-units stability analyses[J]. Yunnan Electric Power Technology, 2010, 39(6) : 105-106.

[7] DL/T1245—2013．水轮机调节系统并网运行技术导则 [S]．北京：中国电力出版社，2013．

[8] 程远楚，张江滨．水轮机自动调节 [M]．北京：中

国水利水电出版社，2010：6-7.
[9] 孙文涛，刘涤尘，赵洁，等. 适用于电力系统稳定分析的冲击式水轮机调节系统动态模型 [J]. 电网技术，2014，38(8)：2071-2075.
Sun Wentao, Liu Dichen, Zhao Jie, et al. Suitable for power system stability analysis of the impact of the turbine regulating system dynamic mode[J]. Electrical Power Technology, 2014, 38(8) : 2071-2075.
[10] 回士光. 电站运行大课堂 [J]. 中国水能及电气化，2008(6)：58-59.
Hui Shiguang, The power station running big classroom[J]. China's Hydropower and Electrification, 2008(6) : 58-59.
[11] 陈丹. 冲击式水轮机电站系统水力过渡过程研究 [D]. 武汉：武汉大学，2004.
[12] 周磊，张丹，刘福锁，等. 异步联网后云南电网的频率特性及高频切机方案 [J]. 南方电网技术，2016，10(7)：17-23.
Zhou Lei, Zhang Dan, Liu Fusuo, et al. Yunnan Power Grid frequency and high frequency after asynchronous networking cutting machine[J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(7) : 17-23.